

HORDÓ ALAKÍTÁSA VÁKUUMMAL, TÚLNYOMÁSSAL ÉS LÖKÉSHULLÁMMAL

Härtlein Károly

BME Fizikai Intézetének Demonstrációs Laboratóriuma, Budapest

E-mail: hartlein@eik.bme.hu

A cikkem témája a nyomás, a nyomáskülönbség és az általuk létrehozott erők szerepeltetése a fizikaoktatásban. Ez az írás bemutatja, hogy mekkora terhelő erők hatnak a nyomással terhelt hordókra. Úgy érzem, hogy a fizikakönyvekben ez nem kap megfelelő hangsúlyt, illetve egyáltalán nem tárgyalják ezt a jelenségekört. A fizika mint tantárgy feladata a környezetünk leírása, működésének megértetése. Ha ez a feladat teljesül, akkor a diák nemcsak szeretni fogja a fizikát, de a körülötte zajló folyamatokat érteni is fogja. Kialakul benne egy megalapozott természettudományos világkép, amely a XXI. században fontos összetevője egy állampolgárnak. Szüksége van erre például akkor, amikor kérdésekre kell válaszolnia, döntenie kell. Például milyen energiaforrást használjunk, milyen megoldásokat használjunk egy energiatudatos épületben, vagy csak a mennyi ideig lehet napozni, az UV sugarak mennyire veszélyesek. Ezekre a kérdésekre ne a celebeknél az influenszerek-nél és egyéb kétes tudású helyeken keressen választ, hanem legyen egy biztos tudása, amely alapján tud jól dönteni.

A hordó implóziója *

Igazi motivációs kísérlet a légnyomással összeroppantani egy acélhordót. A szabványos 200 literes hordó csekély átalakítással hozzákapszolható egy vákuumszivattyú-



1. ábra. Egy összehorpadt hordó az F29-ben

hoz. Függően attól, hogy mekkora teljesítményű a szivattyú, egy-két perc alatt akkora nyomáskülönbség alakulhat ki, hogy a hordó összehorpad, a jelenséget hangos dörrenés kíséri [1].

Ha nincs vákuumszivattyú, akkor is bemutatható a jelenség. Ez esetben a tanterem nem lesz alkalmas helyszín. Ebben az esetben a szükséges nyomáskülönbséget vízfórralással és -hűtéssel is el lehet érni. A módszer:

- a hordóba tenni kell pár liter vizet, majd addig forralni, ameddig a fejlődő gőz ki nem szorítja a levegőt a hordóból,
- ekkor be kell zárni és utána hagyni kell kihűlni a hordót.
- Lehet gyorsítani a folyamatot hideg vízzel történő locsolással, de ez kizárja a tanteremi bemutatást.

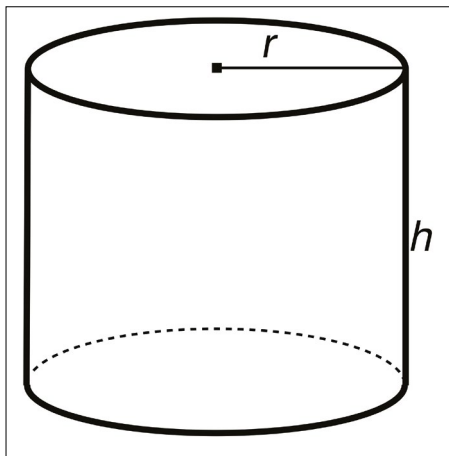
A hordóban lévő gőz, ha lecsapódik, folyadékká válik, a térfogata 1/900-ad részére csökken. A lecsapódó gőz hatására csökken a nyomás is. Ha tökéletesen kiforraltuk a levegőt és lehűlt a hordó, akkor a hordóban csak a gőz nyomása marad, amely 20 °C-on 2338,54 Pa. Az így elért nyomás alig tér el egy iskolai vákuumszivattyú által szolgáltatott vákuumtól [2].

A bemutatót érdemes számolással követni és ez alapján megmagyarázni a látottakat. Jöjjenek az adatok és a képletek, amelyekről sokan irtóznak. A hordó külső felületére a légnyomás hat. A vákuumszivattyúval vagy a forralással elért kisebb belső nyomás hat a hordó belső felületére. Az erőt, amely összeroppantja a hordót, a nyomáskülönbség és a hordó felületének szorzata adja.

* Az implózió fizikai jelentése: üreges test beomlása külső nyomás hatására.



Härtlein Károly 1980-ban a Bánki Donát Gépipari Műszaki Főiskolán szerzett előbb gyártástechnológus-üzemtechnológus, majd gépész műszaki-tanári diplomát, 1990-ben az ELTE-n fizika szakos tanári oklevélét, azóta vezeti a Műgyetem Fizikai Intézetének Demonstrációs Laboratóriumát. Több száz kísérletező fizikaórát tartott diákoknak és tanároknak, még a határainkon túl is. A szkeptikus mozgalom egyik élharcosa. 2005-ben az ő javaslatára a Műgyetem Fizikai Intézetében tartották az első Kutatók Éjszakáját. Sok, fizikát népszerűsítő TV-műsorban szerepelt, ezek közül a „Brutális Fizika” című sorozat volt a legsikeresebb.



2. ábra. A hordó felületének számítása



3. ábra. 2000 méter magasan (balra) és a vásárlás helyszínén (Budapest), 105 méter magasan (jobbra)

Ki kell számolni a hordó felületét [7]. A 200 literes hordó méretei: átmérője 0,58 méter, a sugara $r = 0,29$ méter, magasság $h = 0,88$ méter. Egy henger felületét kell meghatározni; a palástja, az alaplappja és a fedelének területének összege adja a keresett értéket. $2,13 \text{ m}^2$ a teljes felület, ebből a palástja $1,6 \text{ m}^2$.

Szükség van még a légnyomás értékére. A légnyomás fizikaórán már az általános iskolában tananyag. Értéke a Földön 1013 hPa. Ez egy változó érték, függ a tengerszinthez viszonyított magasságtól. Állandó magasság esetén sem állandó az értéke, ugyanis a meteorológiai körülmények, a hőmérséklet, a szélesebség és a levegő páratartalma is hatással vannak az adott helyen mérhető légnyomás értékére.

A légnyomás magasságfüggése jól láthatóvá válik, ha egy légmentesen csomagolt finomságot viszünk magunkkal egy magas hegyre, és megfigyeljük a csomagolás alakját. A bal oldali fényképen egy chipses zacskó látható 2000 méter magasan, épp hogy ki nem durran. Ez Budapesten, a vásárláskor a jobb oldalon látható módon nézett ki (3. ábra).

1013 hPa – ez azt jelenti, hogy egy négyzetméteren 101,3 kN erő oszlik el. Ha a lemezt, amiből a hordó készült síkba kiterítenénk, és a levegő helyett vízzel szeretnénk ekkora nyomást biztosítani, akkor 10,13 m magasan kellene vízzel borítani. Ehhez 21 580 liter vízre lenne szükség, aminek a súlya 21,58 tonna! A hordó tetejére és aljára

is 26,8 kN erő hat, amely két erő iránya ellentétes, így ez az erő a magasságot igyekszik csökkenteni. Hasonlóan elemezve a palástra ható erőt, ez is a szimmetriai okok miatt csak deformálni tudja a hordót, nagysága 189 kN. A hordóra összesen 215,8 kN hat. Ez mintegy húszszorosa egy átlagos autó súlyának! Ugye, hogy érdemes számolni?

Bármilyen érdekes és meglepő a hordó implóziója, felvetődhet a kérdés, mi köze van ennek a kísérletnek a mindennapi élethez? Gyakran éri a fizikatanárokat az a vád, hogy az élettől elszakadt dolgokat tanítanak, felmerülhet ez a kérdés jelen kísérletre is! Nyitott szemmel járva meglepő dolgokat vehetünk észre. Győrről, a Fehérvári úton egy vasúti sínek felett átvezető hídról a 4. ábrán mutatott látvány tárul a szemünk elé.

Amint az jól látszik itt is, a nyomáskülönbség hozott létre maradó deformációt. A vasúti tartálykocsi is ösz-



4. ábra. Összeroppan vasúti tartálykocsi



5. ábra. Bemutatókból visszamaradt hordók

szoroppanhat, ha a benne lévő folyadék lefejtésekor nem biztosítjuk a lefejtett folyadék helyére a levegő szabad beáramlását.

A bemutatóim során a munkahelyemen a kísérletet „elszenvedett” hordók egyre szaporodtak, mert ebben az állapotban már nem kelendő portéka az acélhordó, inkább költség a tőlük való megszabadulás.

Az első bemutatóm alkalmával egy iskola udvarán (Puskás Tivadar Távközlési Technikum) mutattam be forralással a hordó horpasztását, a sikeres bemutató után az iskola igazgatója (Horváth László) javasolta, hogy most sűrített levegővel fújjuk fel [3]. A válaszom az volt, hogy ezt el lehet végezni, de azt én már nem várom meg (aki megnézi az erről szóló videót, az hallhatja is a párbeszédet...)! Hogy miért, az a cikk második feléből derül ki.

A hordó „fordított implóziója”

A Műegyetem 2015 óta minden nyáron megrendezik a Gyerekegyetemet [4]. Idén három szeminárium tartására kértek fel 7. és 8. osztályos diákok számára. Úgy



6. ábra. Egy összehorpasztott hordó részlete

döntöttem, hogy az udvaron fogok bemutatni valami emlékezetes kísérletet. Ehhez éppen kapóra jöttek a fent említett összeroppantott hordók. A fordított nyomáskülönbség képes visszaalakítani az összeroppantott hordót. Egyedül az volt kérdéses, hogy a hordók összehorpadása következtében létre

rejött deformációk a visszalakítást mennyire fogják elviselni. Ugyanis az implózió hatására az elképesztő erők elképesztő deformációkat hoztak létre.



7. ábra. A horpadt hordó feltöltése vízzel

Volt olyan hordó, amelyben az előadás után még egy napig a vákuumot megtartottam. Vagyis még egy napig alakíthatta a nyomáskülönbség a lemez hordót.



Nem sokan látták rajtam kívül, nagyon tanulságos volt. Gépészhallgatók számára lenne fontos az időben hosszú terhelés hatásának jobb megértését szolgálhatná. De ez a hosszú idő miatt nehezen mutatható be.

Kilyukad, vagy nem, ha igen, mekkora lyuk lesz rajta? Ennek a kérdésnek a megválaszolására, mivel a számítás gyakorlatilag lehetetlen, inkább egy kísérlet végeztem el [5]. A kísérlet során keletkezett lyuk a hordó oldalán, de nem akkora, hogy értékelhetetlenné tette volna a kísérletet. A tanulságokat figyelembe véve arra jutottam, hogy egy hordó bemutatása kockázatos, mert megítélésem szerint könnyen előfordulhat, hogy akkora lyuk keletkezik a bemutató során, ami a jelenség bemutatását lehetetlenné teszi. Így jutottam el ahhoz a döntéshez, hogy végezzük el a nyomáspróbát egy még deformálatlan hordóval is. Azon ugyanis nem fog az előző alakítás során elszenvedett deformáció miatt lyuk keletkezni, biztosan sikerülni fog a bemutató, tehát beszereztem ép hordókat is. Így a szemináriumokon két-két hordó szerepelt: egy horpasztott és egy ép. A hordók visszaalakításához – a lemezeket képlékenyen kell alakítani, amihez sok munkát kell végezni – az udvaron található kerti csapból vettem a „munkavégző közeget”, a vizet, amelynek nyomása 3–6 bar közötti volt.

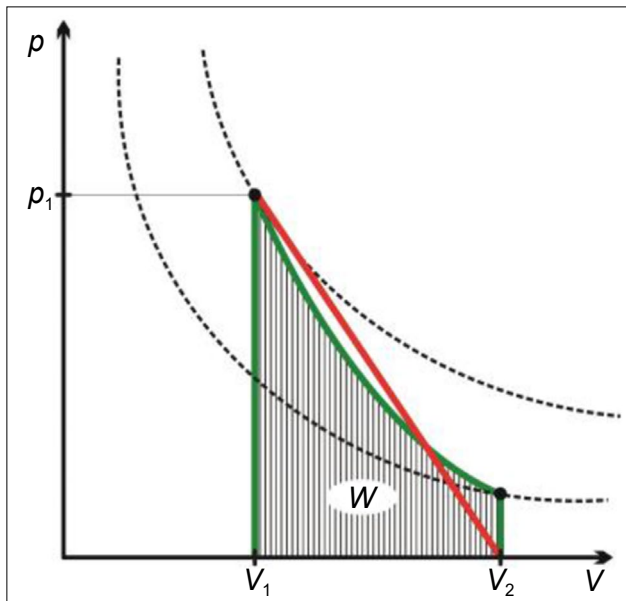
A csatlakozás nagy, 1 colos keresztmetszetű volt. Ez szerencsés körülmény, mert a bőséges vízhozam a szétrepedt hordók esetén még viszonylag nagy lyukak esetén is tudta az alakításhoz szükséges nyomást biztosítani.

A horpasztott hordókat a bemutató előtt igyekeztem a lehetőségekhez mérten vízzel feltölteni, hogy a lehető legkevesebb levegő maradjon a hordóban. A hordó lezárása és a víz csatlakoztatása után indult a bemutató. A beáramló víz a hordót először az eredeti térfogatára, utána még nagyobbra alakította. Így a kísérlethez annyi időre volt szükség, ameddig a kellő mennyiségű víz a csövön keresztül a hordóba áramlott. A repedések megjelenése ezt az időt jelentősen meghosszabbította. A hordóba beáramló víz először a palástot egyenesítette ki, majd a fedő és az alaplap kigömbölyödése volt megfigyelhető. Figyelemre méltó volt még a hordó peremének

kiegyenesedése is, de ezt csak az értékelte, értékelheti, aki dolgozott már acéllemezzel. A jelenség nem csak a szemnek, a fülnek is szolgáltat információval. A hatalmas erő erős hanghatás kísérte. Itt is érdemes felhívni a figyelmet az erők nagyságára. Az implózió, a hordó horpadása során a nyomáskülönbség mintegy 100 000 Pa volt. Kívül volt a nagyobb a nyomás. Itt pedig a hordóban volt nagyobb a nyomás, ami 3–6-szor nagyobb erő kifejtésére lett volna képes. Vagyis a fenti, vákuum esetben számolt erő 3–6 szorosra állt rendelkezésre! $2,13 \text{ m}^2$ a teljes felület, ebből a palást $1,6 \text{ m}^2$. A képletek azt jósolták, hogy a palást fog először kiegyenesedni, így is történt. Ismét beigazolódott számomra, hogy mennyire fontos a képletek ismerete és helyes értelmezése. Beszédeselek, de csak azok számára, akik értik a mondanivalójukat. A jelenség leírására a gépészek által gyakran használt képlet, a kazánformula szolgálhat [4].

A deformálatlan alakú hordók vízzel való „alakítását” is tervezés előzte meg. Az alja és a teteje domborodik, ezért ha álló helyzetű hordóval végezzük a kísérletet, akkor várható a hordó eldőlése. Ennek elkerülésére a palástján fekvő helyzetű hordó mellett döntöttem.

Van egy másik körülmény, amit jól meg kell fontolni, ez a hordó feltöltése vízzel, a légtelenítése a kísérlet előtt. Gondoljuk végig, hogy mit eredményezne, ha megvalósítanánk a korábban már említett „tanácsot”, és az összenyomhatatlan víz helyett a hordót sűrített levegővel próbálnánk alakítani! Ekkor az alakváltoztatáshoz szükséges nyomást a hordóban a sűrített levegő adja; no, de mit fog tenni a levegő, ha szabadon tágulhat a hordó felszakadása, kinyílása után? A hirtelen táguló gáz lehűl, de munkát is fog végezni! Mozgási energiát adhat az útjában álló tárgyaknak. Számoljuk ki a sűrített gáz munkavégző képességét! A pontos számoláshoz az adiabatikus görbe alatti területet kellene meghatározni. Ez még az emelt szintű érettségire készülők számára is túlzás. A 8. ábra



8. ábra. Az adiabatikus görbe alatti terület meghatározása

szerinti közelítés azonban nagyságrendileg helyes értéket adhat. Egyenessel helyettesítettük a $pV^\kappa = \text{const.}$ adiabatikus görbét. Látszik, hogy az így kapott érték kisebb lesz annál az értéknél, amit szeretnénk meghatározni. Amikor az eredményt értékeljük, ott érdemes erre emlékezni. Egy derékszögű háromszög területét kell meghatározunk, melynek egyik befogója a nyomás, a másik a térfogat. A hordó térfogata $0,2 \text{ m}^3$, s így $0,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ -al számolva nem kis érték, 5000 joule adódik. Számoljunk csak egy kicsit! Potenciális energiaként, $mgh = 5000 \text{ J} = 5 \text{ kg} \cdot 100 \text{ m} \cdot 10 \text{ m/s}^2$ lehetne, azaz egy 5 kg tömegű testet lehetne ezzel 100 méter magasba felemelni! Ezt csak fedezékből biztonságos szemlélni!

A kísérleteimben a hordók alakításához ezért használtam vizet, kihasználva, hogy a folyadékok gyakorlatilag összenyomhatatlanok. Így a hordó elszakadásakor nem kell számolni a benne lévő gáz térfogati munkájával. Az összenyomhatatlan folyadékkal elvégezni a kísérletet azt is eredményezi, hogy már kis mennyiségű víz beáramlása nagy nyomást, deformációt fog okozni.

Hasonlóan a horpasztott hordóhoz, a deformálatlan hordóval is végeztem előzetes kísérletet, Pakson, a Múzeumok éjszakáján. Tűzoltók biztosították a vizet és a nyomást! A bemutató tanulságos volt, de fiaszkóval végződött. A hordót buborékmentesre töltöttük fel, így már csekély mennyiségű víz is jelentős nyomást és deformációt okozott a hordóban. A tűzoltók által biztosított vízhozam és a nyomás tekintetében a kísérlet egy szemvillanásig tartott, vagyis egy pillanat alatt szétszakadt a hordó. A kísérlet sikerült, de a nézőknek esélye sem volt érdemben megérteni, hiszen fel sem foghatták a látottakat. A tűzoltók a szivattyút, ami a nagy nyomást biztosította volna be sem tudták kapcsolni, nem volt rá idejük! Így a műegyetemi bemutató napján arra kellett figyelmem, hogy a vízmennyiség szabályozható legyen, így közben tartható legyen a folyamat sebessége.

A háromszori bemutató lehetővé tette, hogy kipróbáljak valamit. A deformálatlan hordókat eltérő mértékben töltöttem fel vízzel. Az első foglalkozáson mintegy $20\text{--}30$ literes buborék maradt a hordó vízzel való feltöltése után, ami szándékos volt. A tapasztalatok alapján a második napon ezt a mennyiséget megdupláztam, míg a harmadik hordót már csak félig töltöttem meg. Így 100 liternyi levegőt kellett összenyomni, hogy kialakulhasson az a nyomás, ami a hordót alakította. Cserébe a víz által összenyomott gáz munkavégző képességével kellett számolni. A bemutatók során a biztonság szem előtt tartásával a kis értékről a nagyobb mennyiség felé fokozatosan haladtam. A munkavégző képesség a hordóban lévő levegő mennyiségével egyenesen arányos. Számoljunk, most is érdekes adatokhoz juthatunk! Ha buborékmentesre töltjük a hordót, akkor akár 10 liter víz beáramlása után már akkora nyomás lesz, hogy a hordó elszakadhat. Ha a hordó félig van vízzel, vagyis van benne 100 liter levegő, akkor a vízcsap megnyitásakor beáramló víz ezt a levegőt kezdi összenyomni, ez a levegő fogja a nyomást adni. Az előbbi 10 liter víz beáramlása 90 literre nyomja össze a levegőt, amely nyomása könnyen számítható a gáztörvények ismeretében. $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$ – a nyomás csak 11% -kal növekedik meg. Így a beáramló víz sebességével jól lehet szabályozni a folyamat sebességét. A víz által összenyomott levegő a hordó elszakadásakor azt tette, amit a számítások alapján vártam tőle. Durrant is jó nagyot a harmadik, a félig töltött hordó [5]. A videó nem adja vissza a durranás hangerejét. Először a teteje és az alja dudorodott ki, ezután kiegyenesedett a peremezés, végül a hegesztés mentén szakadt el a hordó. Ha a peremezést ki akarnánk egyenesíttetni, ahogy a nyomás teszi, nem hiszem, hogy találnánk lakatost, aki elvállalná! A nyomás hatására az alakváltoztatás meglepően egyszerű művelet.

Így a szakadáskor az összenyomott gáz energiája jó kézben tartható, talán a továbbiakban érdemes lenne egy nyomásmérővel kiegészíteni a kísérletet, ekkor az érdeklődőknek szolgálhatunk további érdekes adattal.

Beszéljünk a hordókról is! A vegyszeres hordók méretét, kialakítását anyagát nemzetközi hatályú szabványok írják elő. Olyan hordót kell készíteni, ami nagyjából „bolondálló”, nem szabad kilyukadnia akkor sem, ha pl. egy teherautó platójáról rakodás közben leesik. A horpadás befelé, a lyukadás nem (pl. veszélyes és gyúlékony anyagok esetén). Nyomással nem kell számolni, mert a folyadékoknak, amelyeket szállítani lehet benne, a gőznyomása nem számottevő.

Hordó alakítása lökeshullámmal

Több mint 10 éve a „Brutális fizika” című filmben lökeshullámmal alakítottam hordókat. Ez az alakváltozás egy teljesen más jelenséggel magyarázható. Ebben az esetben egy 200 literes nyitott tetejű hordót használtunk, amit színültig töltöttünk vízzel. A hordó aljának közepére egy csigaszerkezet segítségével húztunk le egy 5 literes, vastag falú alumínium hordót, amiben 1 kg cseppfolyós



9. ábra. Hordó alakítása lökeshullámmal

nitrogén volt légmentesen lezárva. Az alumínium hordó nyomásálló edény volt, eredetileg 2,5 kg propán-bután gáz tárolására tervezték. Ezeknek a tartályoknak a nyomáspróba során 25 bar nyomást kell kiállniuk; a nyomásálló edények méretezésakor azonban akkora biztonsággal számolnak, hogy ennek akár a kétszeresét is elviselhetik felrobbanás nélkül. Egy kilogramm nitrogén normál állapotban közel 1000 liter térfogatú, és cseppfolyós állapotban mindösszesen 5 liternyi térfogat áll rendelkezésére. A nitrogén a környezettől kapott hő hatására forr, ennek eredményeként kialakuló nyomás messze meghaladja az alumíniumpalack nyomástűrését. Vagyis felrobban a 200 liternyi víz alján. Az elszabaduló energia egy lökeshullámot indít, amely a hordót akkora terhelésnek veti alá, hogy az képlékenyen fog alakulni. A lökeshullám terjedési sebessége a hang vízben mért terjedési sebességével egyenlő.

Ahhoz, hogy a nyitott tetejű hordóban – amelyből felfelé szabadon távozhat a víz – ekkora deformáció alakuljon ki, kell a víz nagy tehetetlensége és az, hogy az összenyomott gáz energiája gyorsan, robbanásszerűen szabaduljon fel és jusson el a hordó falához. A kísérlet során az alumíniumhordó robbanását követően a ki-

alakuló nyomás értéke miatt már nem is tekinthetjük a vizet – középiskolás módon – összenyomhatatlannak. Így egy nagy tehetetlenségű, összenyomható folyadékban terjedő lökeshullámmal már magyarázható, hogy a nyitott tetejű hordó miért deformálódik. Szokatlan körülmények között zajlott a felvétel, mert ekkor végeztük el először. Főpróbára nem volt lehetőség, így csak a számításaim alapján várhatókra készültünk. A gépészmérnöki tanulmányaimra támaszkodtam, próbáltam kiszámolni, megjósolni, hogy mi várható. Mi fog történni az alumíniumhordóval, és mi a 200 literes acélhordóval? Az alumíniumhordóról tudtam, hogy fel fog robbanni. Az anyaga és az anyagának állapota alapján arra jutottam, hogy egyben fog maradni. Az acélhordóról tudtam, hogy nagyon meg fog nyúlni a palástja, a várható megnyúlás értéke akkorára adódott, hogy várható volt a palástjának elszakadása. Aki megnézi a felvételt, az láthatja, hogy jól sikerült megbecsülni a kísérlet kimenetelét. Az acélhordó kerülete 400 mm-rel lett hosszabb, de nem hasadt fel a palástja. Az alumíniumhordó felrobbant, de egy darabban maradt. A hordóban lévő víz jelentős hányadát mintegy húsz méter magasra repítette a lökeshullám.

Tanulságok

Zárt hordó alakítása kétféle lehet, függően a nyomáskülönbségtől. Ha a légnyomásnál kisebb nyomást hozunk létre benne, akkor összehorpad, ha nagyobb, akkor először növekszik a térfogata, majd, amikor már nem tudja elviselni a további nyúlást akkor elszakad. Mindkét folyamat elvégzéséhez nagy erőkre van szükség. Az erő létrehozása lehet lassú folyamat, az alakváltozás szemmel jól követhető. A lökeshullámmal történő alakítás nagyon gyors folyamat. A felvétel során 800 frame/sec sebességű kamerát használtunk. Egy frame, egy képkocka 0,00125 másodperc alatt készült el. A hordó deformálatlan állapotától ennyi idő telt el, amíg a hordó végleges alakját elnyerte. A kísérlet elvégzése után hordó palástjának a legnagyobb átmérőjénél a lemez 400 mm-nyi megnyúlását mértem.

Hivatkozások

1. Hordóhorpasztás az F29-ben: https://youtu.be/S03UyLWy_wc?t=5367
2. Hordóhorpasztás forralással udvaron, a Puskás Tivadar Távközlési Technikumban: <https://youtu.be/S8kCQubYSSE>
3. A víz gőznyomása: [https://hu.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADz_\(adatlap\)](https://hu.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADz_(adatlap))
4. Fordított implózió nál mennyire sérül? <https://youtu.be/W34QL8wD8rw>
5. Kazánformula: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Tart%C3%A1ly>
6. A szürke hordó alakul: https://youtu.be/Ulggtvm8u8M?list=PLHSoRpWbbL_231wNv0gUDAE-hWS5Kyt21
7. A hordó felszínének számítása, magyarul: https://nat2012.nkp.hu/tankonyv/matematika_7/lecke_06_011; A hordó felszínének számolása, angolul: <https://www.omnicalculator.com/math/surface-area>